中国生态农业学报 2016 年 3 月 第 24 卷 第 3 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Mar. 2016, 24(3): 274−283

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.150747

豫北冬小麦、夏玉米多年需灌水次数及典型生育期需灌水分析*

陈 震[1,2] 李金山[1] 黄修桥[1**] 贾艳辉[1] 孙秀路[1] 杨晓慧[1,2]

(1. 中国农业科学院农田灌溉研究所/河南省节水农业重点实验室 新乡 453002;
2. 中国农业科学院研究生院 北京 100083)

摘 要 研究气候变化情景下豫北地区农业需灌水次数的变化情况，可为当地灌溉以及保证农业可持续发展提供参考。本文分析处理近 63 a(1951—2013 年)气象数据和新乡七里营站点土壤数据，结合作物生长参数，利用降水、灌溉、作物蒸散发与土壤水分之间变化关系，建立干旱灌水指数模型。此模型中干旱灌水指数(DII)分布在[−1, 1]之间，小于 0 时即干旱需灌水。在现有冬小麦−夏玉米种植制度下，利用干旱灌水指数模型计算多年需干旱灌水指数，并进一步得到灌水次数。选择冬小麦生长季分别为湿润(1985—1986 年)、正常(2004—2005 年)、干旱(1983—1984 年)的 3 个典型实际代表年度，夏玉米生长季分别为湿润(2003 年)、正常(1993 年)、干旱(2009 年)的 3 个典型实际代表年，计算了不同代表年冬小麦、夏玉米作物需水情况。进一步计算得到了冬小麦、夏玉米在典型湿润、正常、干旱 3 个不同代表年的干旱灌水指数，并进行了有无灌水的干旱情况分析。结果表明：近 63 a 冬小麦−夏玉米系统每年需灌水 2~7 次不等，平均需灌水 5.1 次。冬小麦和夏玉米湿润、正常、干旱 3 个代表年蒸散发量(ET_C)分别为 489.4 mm、551.4 mm、481.7 mm 和 466.1 mm、477.8 mm、529.3 mm。在无灌水条件下典型代表年内，冬小麦、夏玉米都会遭遇不同程度干旱，典型湿润、正常、干旱代表年冬小麦分别灌水 2 次、3 次、4 次，夏玉米分别需灌水 1 次、2 次、3 次后，基本可以消除干旱对其正常生长影响。综上，通过干旱灌水指数来量化需灌溉次数是可行的。气候变化情景下，近 10 年(2003—2013 年)需灌水频次变化大，年际间干旱事件频发，更好的科学灌溉管理可减少干旱对作物的影响。

关键词 气候变化 干旱 冬小麦−夏玉米种植制度 干旱灌水指数 灌水次数 典型年份
中图分类号: S274.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)03-0274-10

Multi-years required irrigation times of winter wheat and summer maize and analysis of irrigation in representative growing seasons in northern Henan*

CHEN Zhen[1,2], LI Jinshan[1], HUANG Xiuqiao[1**], JIA Yanhui[1], SUN Xiulu[1], YANG Xiaohui[1,2]

(1. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences / Henan Key Laboratory of Water-saving Agriculture, Xinxiang 453002, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract With globe climate changing, the intensifying uncertainty of precipitation induced inconsistency of irrigation schedule in different years and at different growth stages of crops. Therefore, conventional irrigation schedule fails to guide irrigation activities precisely. It becomes increasingly important for irrigation management and sustainable development of agriculture to explore changes of agricultural irrigation requirement against the background of frequently extreme meteorology events. In this paper, meteorological data of the recent 63 years (from 1951 to 2013) and soil data in Xinxiang City of northern

* 国家科技支撑计划项目(2012BAD08B02, 2012BAD08B05-2)和“十二五”国家科技计划农村领域课题(2014BAD12B05)资助
** 通讯作者：黄修桥，主要从事农业水资源高效利用节水灌溉新技术研究。E-mail: huangxq626@126.com
陈震，主要从事农业水资源高效利用研究。E-mail: chenzhen@caas.cn
收稿日期：2015−06−30 接受日期：2015−10−30

* The study was supported by the National Key Technology Research and Development Program (No. 2012BAD08B02, 2012BAD08B05-2) and the Twelfth Five-Year-Plan in National Science and Technology for the Rural Development (No. 2014BAD12B05).
** Corresponding author, E-mail: huangxq626@126.com
Received Jun. 30, 2015; accepted Oct. 30, 2015

Henan, as well as crop growth parameters were used to establish the model of drought irrigation index according to the relationships among precipitation, irrigation, evapotranspiration (ET_C) and available soil water. In the model, drought irrigation index (DII) was [−1, 1]. Once DII was less than 0, irrigation was necessary. On the basis of winter wheat-summer maize planting schedule in the study area, the model was used to calculate multi-year DIIs for the recent 63 years. Consequently, annual irrigation times potentially meeting the agricultural requirement were obtained based on DIIs from 1951 to 2013. Three representative growing seasons of winter wheat and summer maize were selected as wet (1985–1986 for winter wheat, 2003 for summer maize), normal (2004–2005 for winter wheat, 1993 for summer maize) and dry (1983–1984 for winter wheat, 2009 for summer maize) growing seasons. Water requirement of two crops in different growing seasons were calculated, and DIIs in there representative growing seasons of winter wheat and summer maize were calculated too under the conditions with and without irrigation. The results showed that required annual irrigation times ranged from 2 to 7 with an average of 5.1 in recently 63 years in norther Henan Province. ET_C of winter wheat and summer maize in wet, normal, dry growing seasons were 489.4 mm, 551.4 mm, 481.7 mm and 466.1 mm, 477.8 mm, 529.3 mm, respectively. Under the condition without irrigation, the winter wheat and summer maize suffered varying degrees of drought in typical growing seasons. Winter wheat respectively needed 2, 3, and 4 times irrigation, while summer maize respectively needed 1, 2 and 3 times irrigation in wet, normal and dry actual representative growing seasons. Even if in wet growth seasons of summer maize, irrigation also required during periods with high ET_C but no timely rainfall. DII could guide irrigation well according to the relationship among meteorology, available soil water and crop growth information. It was practicable to decide irrigation time with DII. With climate changing from 2003 to 2013, the frequency of irrigation times fluctuated more remarkable, and interannual drought stress took place more frequently than the past 63 years. Scientific and reasonable irrigation managements should be worked out in order to reduce the influence of drought stress on crop growth.

Keywords　Climatic change; Drought; Winter wheat-summer maize cropping system; Drought irrigation index; Irrigation times; Typical years

气候变化加剧致使极端天气事件发生频率加大[1], 近年来, 干旱作为极端天气事件无论在强度和频次上都有一定增强趋势[2–5]。我国很多地方时空降水分布极不均匀, 特别是华北地区在冬小麦主要需水生育时期, 降水少, 易引发干旱[6–7]。农业干旱不仅仅是降水短缺, 土壤中有效可利用水分含量、作物根系吸水能力、蒸散发、灌水等都是影响农业干旱的主要因素[8]。干旱指数作为衡量作物干旱程度量化指标, 受到广泛研究和接受, 其中, 作物水分胁迫指数(CWSI)[9]提出较早, 可提供灌水时间等信息, 在很多研究中被应用推广[10–12], 当作物充分供水时 CWSI 值为 0, 严重缺水时为 1; 但干旱临界点不易区分。此外, CWSI 计算所需冠层温度在实际测量中较难监测[8]。

目前, 灌溉制度的研究较多。灌溉制度的内容主要是灌溉定额、灌水定额、灌溉次数以及灌溉时间等。针对灌溉制度的内容, 研究人员开展了不同作物、不同地区、不同方法等内容研究[13–15]。如 Shang 等[16]以华北地区冬小麦、夏玉米两种作物为整体研究对象, 通过模型模拟土壤水分动态变化, 在不同降水典型年对不同灌溉处理进行分析灌溉制度, 受降水和其他气象因素的影响, 发现灌溉制度和实时灌溉之间存在距离。同样在不同的地区, 灌溉制度亦不相同, 如民勤地区对小麦的灌水次数和灌水量和华北地区有差异[16–18]。降水是影响灌溉制度的一个重要因素, 降水的不确定性, 致使灌溉制度很难有统一性[16]。王声锋等[14]根据 30 a 降水资料, 利用蒙特卡罗方法对其进行模拟出长系列旬降水, 在广利灌区得到不同灌溉制度, 发现灌溉定额为 60 mm、120 mm、180 mm、240 mm 时, 灌水次数分别为 2 次、3 次、4 次、6 次, 高产概率分别为 1%、12%、62.8%和 98.8%。此外, 降水的不确定性, 致使对干旱的预测也存在一定难度[2]。根据气象信息, 结合作物需水, 可以在一定程度上预测作物的干旱态势[3]。如 Ozelkan 等[19]利用标准化降水指数(SPI)和归一化植被指数(NDVI)分析土耳其地区灌溉和雨养作物干旱情况, 发现干旱指数监测农业干旱比较可行。此外, 前人用 DASST 中 CERES-Wheat 模型, 研究作物需水及其灌溉制度表明, 当土壤含水量降到田间持水量的 65%时, 春小麦应灌水, 否则产量将受到影响。土壤水分为田间持水量的 65%可以作为干旱灌水时间节点, 判定是否需灌水。目前黄淮海地区, 以冬小麦–夏玉米种植制度为主[20–21]。模型确定两种作物的灌溉制度, 在模拟的准确性及实用性方面存在问题[16,22]。然而, 根据近年的关于气候变化的研究, 干旱等极端干旱事情发生频率增加, 预测的难度也在不断加大[23]。在一些区域, 冬小麦生长季降水有减少趋势, 而在夏玉米生长季, 降水有增加趋势, 即容易出现“旱越旱, 涝越涝”的情景[7,24–25]。

目前的灌溉制度在气候变化背景下, 很难再准确地指导生产。而干旱又是灌溉的主要时间节点[26]。

然而，针对气候变化情况，研究灌溉制度变化情况的报道很少。目前，在很大程度上引黄管理部门及农民灌溉关注的重点是灌水次数，而通过干旱指数确定灌溉次数又是便捷而准确的方法。为此，本文利用水量平衡原理，考虑土壤水分、蒸散发，降水、灌溉等因素之间的关系，建立了干旱灌水指数，以明确灌水时间，进而确定需灌水次数。利用 1951—2013 年水文气象数据，在分析干旱、正常和湿润实际代表年数据的基础上，进行如下研究：1)提出干旱灌水指数；2)计算 1951—2013 年在冬小麦–夏玉米种植制度下，每年需灌水次数；3)对比分析不同典型生育期冬小麦、夏玉米干旱需灌水情况。明确多年来灌水次数的变化，为研究区域引黄调水及制定灌溉制度提供参考。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于豫北地区河南省新乡市的人民胜利渠渠灌区及其周边区域，地处黄河北部冲积扇平原区，海拔 73 m，该区属温带季风气候，1951—2013 年，年平均气温为 14.46 ℃，平均降水量 562.21 mm，降水主要集中在 6—9 月。该区域主要以种植冬小麦、夏玉米为主。灌溉制度在不同的水文年型不同，正常冬小麦灌 3~4 次，夏玉米基本无灌水，灌溉水主要以引黄河水和地下水为主。

1.2 数据来源

本文所用数据分为气象数据、土壤数据和作物系数。其中气象数据为中国气象数据中心新乡站点地面日气象资料，数据从 1951—2013 年共 63 a。数据主要包括平均最高、最低气温，平均降水量，平均风速，平均日照时数，平均水汽压，相对湿度，平均气温。新乡站点 1951—2013 年降水量分布见图 1。豫北地区冬小麦、夏玉米 K_C(作物系数)来自参考文献[27]，其月均值如表 1 所示。

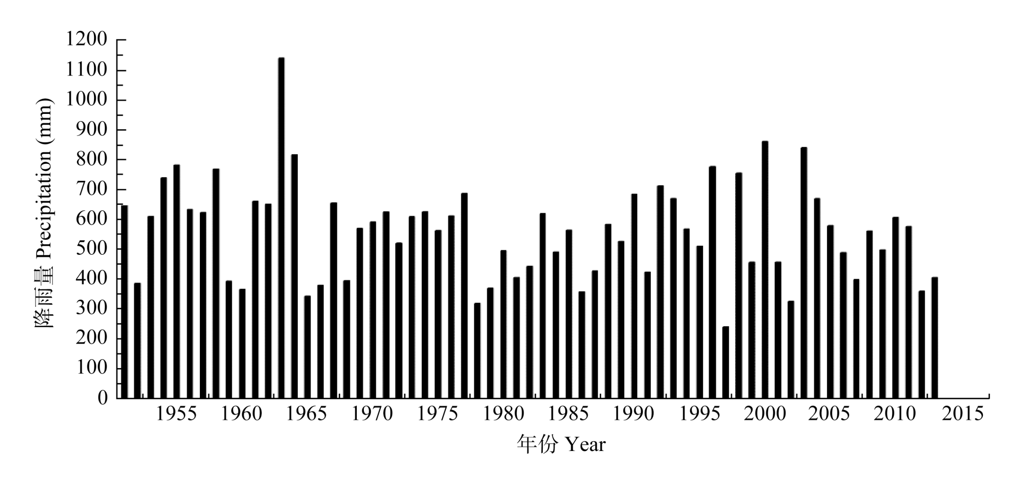


图 1 豫北研究区 1951—2013 年降水量分布

Fig. 1 Distribution of precipitation from 1951 to 2013 in the study area in northern Henan Province

表 1 豫北研究区冬小麦、夏玉米作物系数

Table 1 Crop coefficients of winter wheat and summer maize in the study area in northern Henan Province

冬小麦 Winter wheat	10 月 Oct.	11 月 Nov.	12 月 Dec.	1 月 Jan.	2 月 Feb.	3 月 Mar.	4 月 Apr.	5 月 May	6 月 Jun.
	0.61	0.93	0.97	0.31	1.01	0.98	1.41	1.33	0.63
夏玉米 Summer maize	6 月 Jun.	7 月 Jul.	8 月 Aug.	9 月 Sep.					
	0.85	1.32	1.79	1.26					

土壤数据采用研究区代表地块，于 2013 年 5 月取土样 6 组，深度 1 m，测量颗粒组成得到，豫北地区为黄河冲积扇平原，土壤质地变化不大，土壤颗粒组成见表 2。采用 USDA 分类分析土壤为砂壤土。取灌前灌后土样采用烘干法测土壤水分含量，并利用双环刀法[28]确定田间持水量为 28%，考虑凋萎系数以及作物根系对水分吸收难易程度，土壤 1 m 深度范围内，作物根系有效可利用水分为 120 mm。

1.3 干旱灌水指数模型

利用土壤水分平衡原理，考虑作物蒸散发量、降水量、灌水量与土壤中有效可利用水量之间的关系，以能否满足作物需求为目标，建立干旱指数与时间变化的关系。当降水和土壤中有效可利用水分无法满足作物蒸散发时，水分对作物正常耗水出现胁迫现象，此时亦为干旱，干旱历时较长需灌水缓解干旱保证作物正常生长[17,26]。

表 2　研究区代表地块 0~1 m 土层土壤颗粒组成

Table 2　Soil particle compositions of different soil layers (0–100 cm) of typical fields in the study area in northern Henan Province

土层 Soil layer (cm)	土壤类型 Soil type	黏粒 Clay (<0.002 mm)	粉粒 Loam (0.002~0.02 mm)	沙粒 Sand (0.02~2 mm)
0~20	粉(砂)质壤土 Loamy sand	4.67±0.94	52.28±11.36	43.06±12.30
20~40	砂质壤土 Sandy loam	4.01±2.73	38.82±6.59	57.17±9.32
40~60	砂质壤土 Sandy loam	3.88±0.64	35.61±6.11	60.52±6.34
60~80	壤土 Loam	5.53±0.75	41.51±9.30	52.97±9.33
80~100	砂质壤土 Sandy loam	3.65±2.49	37.12±27.21	59.23±29.69

$$\theta = f_1\left(P, \mathrm{ET_C}, I, \mathrm{SWA}\right) = \frac{P + I - \mathrm{ET_C} + \mathrm{SWA}}{\left|P - \mathrm{ET_C}\right|} \quad (1)$$

式中: θ 为某一时刻作物有效根系深度内可吸收利用的土壤水分相对值; P 为降水, mm; $\mathrm{ET_C}$ 为蒸散发, mm; I 为灌水, mm; SWA 为土壤中有效可利用水分, 即为土壤含水量与凋萎系数之差 65%[17,22], mm。

$\mathrm{ET_C}$ 由公式(2)计算, 利用 Penman-Monteith 公式计算 ETo(潜在蒸散发):

$$\mathrm{ET_C}=K_\mathrm{C}\times\mathrm{ET_O} \quad (2)$$

$$w = f_2\left(\theta, t\right) = \int_{t_i}^{t_{i+n}} \theta dt = \frac{\sum_{i}^{i=n}\left(P_i - \mathrm{ET_{C\mathit{i}}} + I_i\right) + \mathrm{SWA}}{\left|P_i - \mathrm{ET_{C\mathit{i}}}\right|} \quad (3)$$

式中: w 为 t_i 到 t_{i+n} 时刻内 θ 的时间变化量, 取 t 的时间单位日, i 为作物生育期第 $i(i>0)$日; P_i 为第 i 日降水, mm; $\mathrm{ET_{C\mathit{i}}}$ 为第 i 日蒸散发, mm; I_i 为第 i 日灌水, mm; 其余同上。

$$\mathrm{DII} = f_3\left(w\right) = \frac{2}{\pi}\mathrm{ATAN}\left(w-1\right) \quad (4)$$

式中: DII 为干旱灌水指数。关系式满足 DII 值分布在[−1, 1]。当 DII<0 预示土壤可利用水分无法满足土壤耗水需求, 此时, 出现干旱, 即需灌水。

本文采用有无灌水分析, 无灌水情景是假定没有灌水仅依靠雨养, 分析作物在生育期内可能面临的干旱情况, 进而得到生育期内发生的干旱次数。有灌水的情景是, 计算的干旱灌水指数小于 0 时, 开始灌水, 灌水到土壤中水分达到田间持水量为止。随着作物生长, 蒸散发不断地消耗土壤水分, 当再次出现干旱指数小于 0 时, 即为再次干旱, 亦需灌水, 以此统计灌溉次数, 并得到每年需灌水次数。

本文数据通过 Microsoft Excel 处理, 由 Origin 9.0 作图。

2　结果与分析

2.1　冬小麦–夏玉米系统多年需灌水次数

通过 1951—2013 年数据, 分析计算干旱灌水指数, 得到了在冬小麦、夏玉米种植制度下历年需灌水次数, 如图 2 所示, 在冬小麦、夏玉米种植制度下年度需灌水次数大多在 4~6 次, 63 a 平均需灌水次数 5.1 次, 其中有 7 个年份特别干旱需灌水 7 次, 分别为 1959 年、1965 年、1966 年、1968 年、1997 年、2001 年和 2002 年, 3 个年份比较湿润只需灌水 2 次, 分别为 1964 年、1990 年和 2003 年。20 世纪 90 年代开始, 年需灌水次数波动加剧, 一定程度上是气

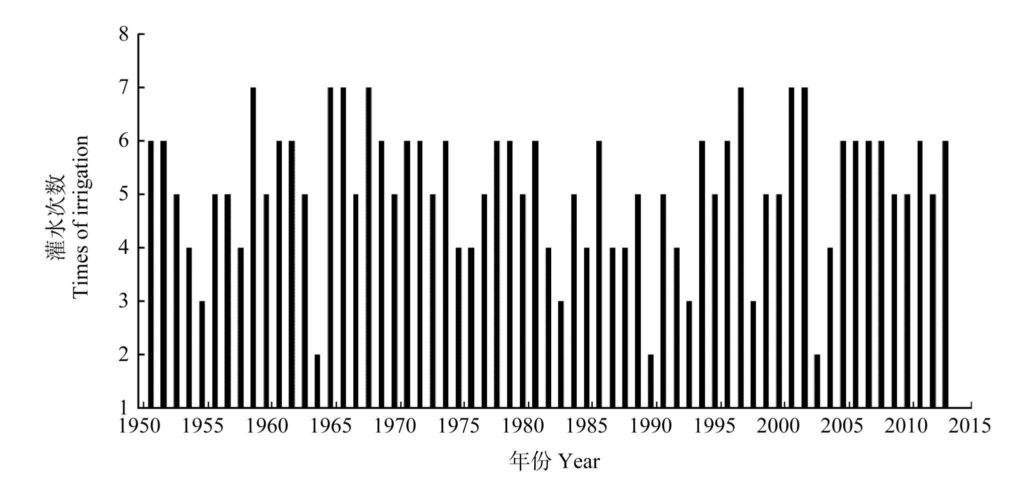


图 2　1951—2013 年研究区冬小麦–夏玉米的年需灌水次数

Fig. 2　Annual required irrigation times of winter wheat-summer maize planting system from 1951 to 2013

候变化加剧了极端天气事件的发生频率所致[29]。2000 年以后平均需灌水次数 5.5 次，高于 1951—2013 年近 63 a 的平均数据，气候变化对需灌水次数有一定影响。以下重点分析 3 个不同典型生育期冬小麦夏玉米的干旱灌水指数。

2.2 冬小麦、夏玉米典型生育期内需水特征

利用针对降雪、冰、雹、霜、露等降水及风速修正后的气象数据，经实际典型代表年处理得到 *P*(频率)=75%、50%、25%的干旱、正常、湿润 3 个水平的实际典型生育期[30](由于冬小麦生育期跨年度而玉米的生育期不足 4 个月，典型代表年用典型生育期表示)。冬小麦的 3 个典型生育期分别为：湿润生育期 1985—1986 年、正常生育期 2004—2005 年、干旱生育期 1983—1984 年，多年生育期平均 240 d 左右，10 月 10 日左右播种，次年 6 月 5 日左右收割。3 个典型生育期降水分布如图 3 所示。夏玉米典型生育期为：湿润生育期 2003 年、正常生育期 1993 年、干旱生育期 2009 年，多年夏玉米平均生育期为 100 d 左右，6 月 10 日左右播种，9 月 17 日左右收获。不同玉米典型生育期内降水分布如图 4 所示。

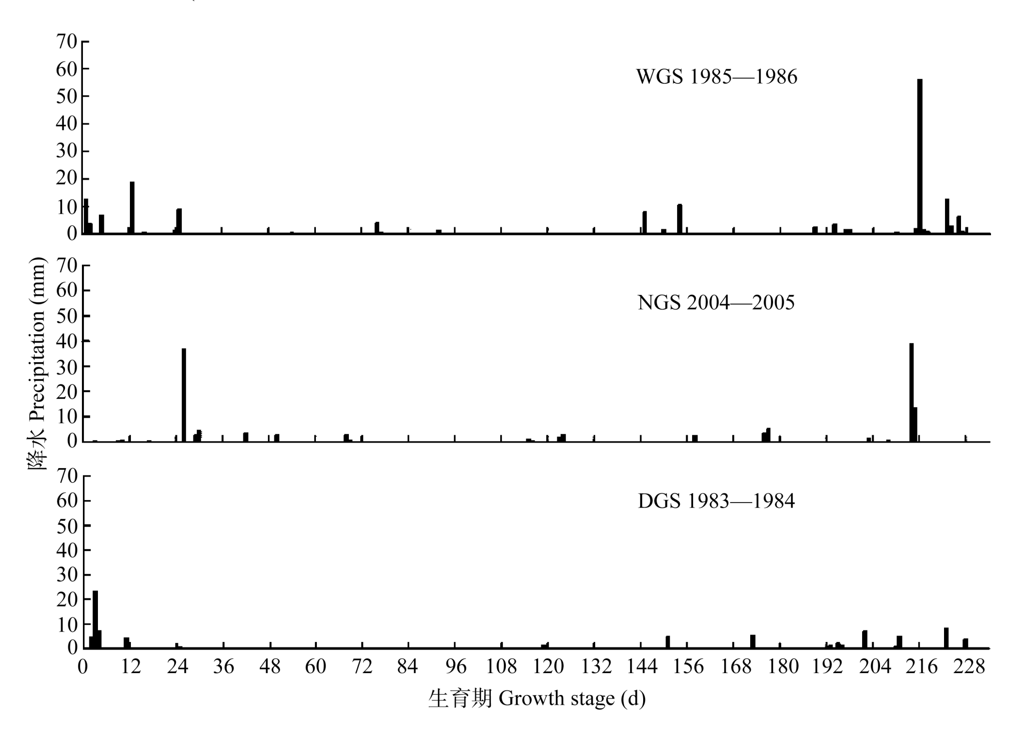


图 3 冬小麦干旱(DGS)、正常(NGS)和湿润(WGS)典型生育期的降水分布

Fig. 3 Distributions of precipitation in different actual representative growth seasons of winter wheat (DGS: dry growth season; NGS: normal growth season; WGS: wet growth season)

计算得到的冬小麦、夏玉米 ET_C 如图 5 所示：冬小麦、夏玉米 3 个不同典型生育期 ET_C 有差异，但总体趋势一致。从图 5a 可知，冬小麦 ET_C 从 10 月份播种后到 12 月份呈现缓慢增高趋势，典型正常生育期波动相较湿润、干旱生育期大，从播种后 70~108 d 冬小麦 ET_C 全生育期呈现最低值期，亦越冬期需水量最少；越冬期后开始到乳熟总体呈现逐渐上升趋势。从不同实际代表年情况看，冬小麦总 ET_C 值正常生育期>湿润生育期>干旱生育期。

从图 5b 可知夏玉米生育期内 ET_C 走势呈现波动上升、下降趋势，这是夏玉米生长发育与气象因素共同作用的结果，很好展现了夏玉米生育期需水特征。在 3 个不同典型生育期，夏玉米总 ET_C 值干旱生育期>正常生育期>湿润生育期。

2.3 冬小麦干旱灌水指数

计算得到无灌水的冬小麦干旱灌水指数如图 6a，干旱指数小于 0 即为干旱。图中可看出，若无灌水，单靠雨养情景，3 个典型生育期都会出现不同程度、不同历时的旱情。湿润生育期总干旱天数为 50 d 左右，分别在播种后 165 d 后左右出现历时 50 d 左右干旱，旱情集中在比较关键的拔节期到抽穗期，也是冬小麦生长需水比较多的时期。正常生育期总干旱天数为 85 d 左右，从图中可以看出大概在生育期的 148 d 开始，直到生育期结束，其中中间在生育期的 220~227 d 有 1 周脱离干旱期。干旱生育期会出现 190 d 左右干旱，也就是播种 40 d 后冬小麦在干旱生育期大都处在干旱中，只在 150 d 的 1 次降水能短暂缓解干旱，随后又处于干旱。

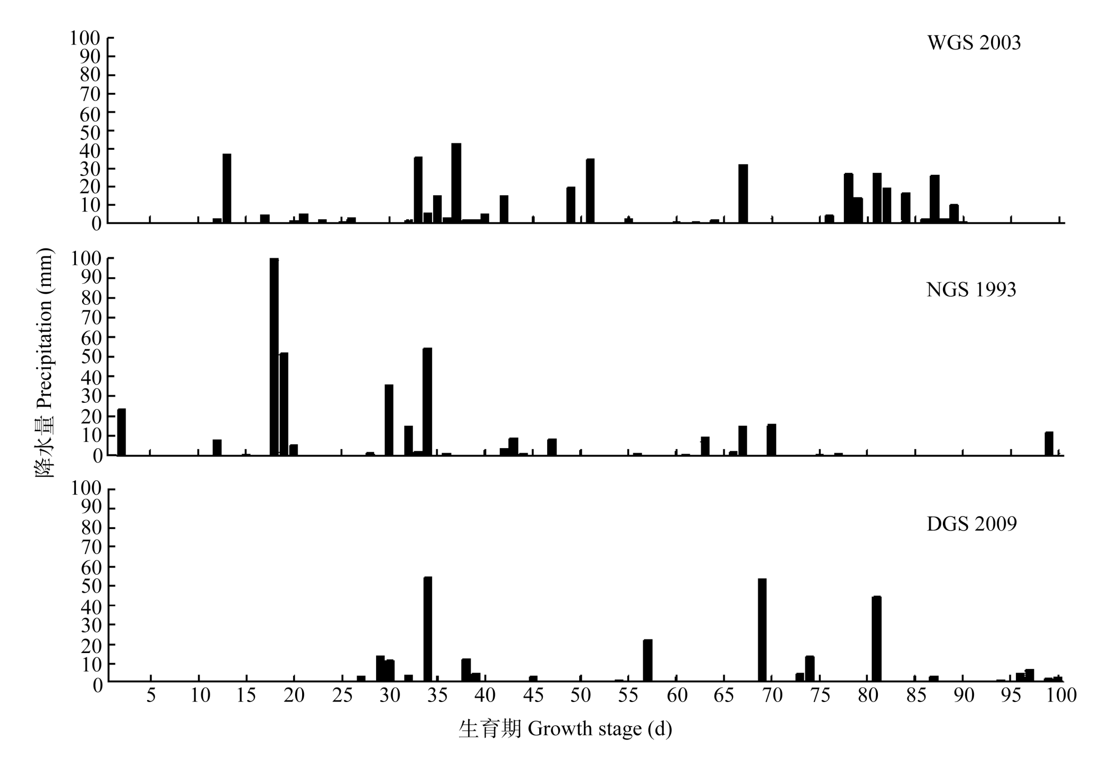


图 4　夏玉米干旱(DGS)、正常(NGS)和湿润(WGS)典型生育期降水分布

Fig. 4　Distributions of precipitation in different actual representative growth seasons of summer maize (DGS: dry growth season; NGS: normal growth season; WGS: wet growth season)

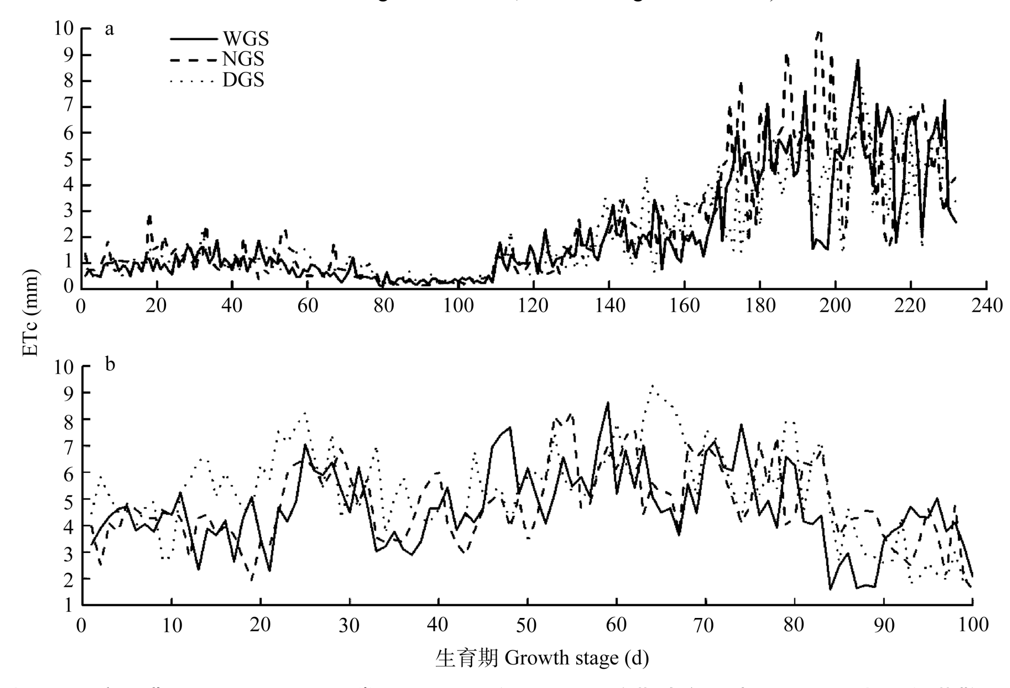


图 5　豫北地区不同实际典型干旱(DGS)、正常(NGS)、湿润(WGS)生育期内冬小麦(a)和夏玉米(b)的蒸散(ET_C)变化特征

Fig. 5　Dynamic changes of crop evapotanspiration (ET_C) of winter wheat (a) and summer maize (b) in different actual representative growth seasons in the study area in northern Henan Province (DGS: dry growth season; NGS: normal growth season; WGS: wet growth season)

灌水后干旱灌水指数如图 6b 所示，冬小麦湿润生育期总需灌水(灌水用 I 表示)2 次，分别为：播种 165 d 后灌一次拔节水，在生育期的第 200 d 抽穗期再灌一水即可。冬小麦正常生育期总需灌水 3 次，分别为生育期 146 d、185 d、205 d 各灌水一次。冬小麦干旱生育期总需灌水 4 次，分别为播种后 37 d 左右灌一次越冬水，生育期第 152 d、192 d、220 d 各灌水一次。这样即使偶有短时干旱胁迫，可促进作物自身生理机能，增强作物生命力[31]，可保证冬小麦生长需水，避免长时干旱对冬小麦正常生长造成不利影响。

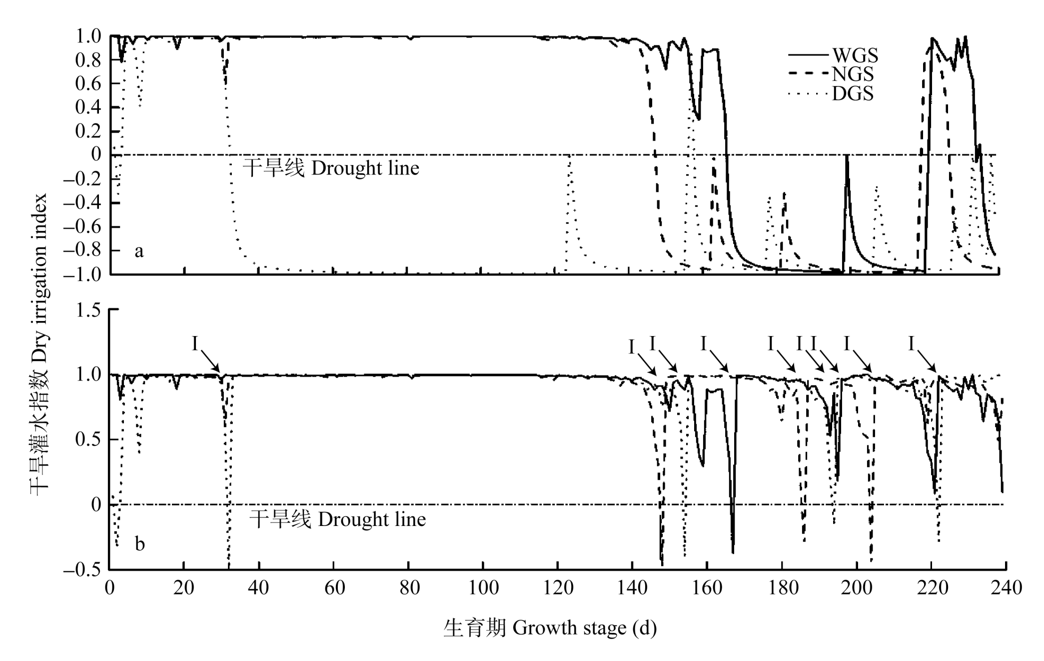


图 6 豫北地区不同实际典型干旱(DGS)、正常(NGS)和湿润(WGS)生育期内无灌水(a)和灌水后(b)冬小麦干旱灌水指数的变化

Fig. 6 Dynamic changes of dry irrigation indexes (DII) of winter wheat without irrigation (a) and with irrigation (b) in different actual representative growth seasons in the study area in northern Henan Province (DGS: dry growth season; NGS: normal growth season; WGS: wet growth season)

图 b 中"I"表示灌水，下图同。In figure b, "I" shows irrigation. The same as the figure 7.

2.4 夏玉米干旱灌水指数

夏玉米不同典型生育期内干旱形势如图 7a 所示，图中可以看出湿润、正常、干旱 3 个典型生育期若无灌水都会出现干旱情景，湿润、正常、干旱 3 个典型生育期总干旱天数分别为 25 d、37 d、58 d 左右。湿润生育期干旱主要发生在刚播种时，由于降水不及时，加之 6 月份气温高等因素导致干旱，历时 10 d 左右；随后在播种 20 d 后会出现历时 10 d 多的干旱；然后直到播种 70 d 后又会出现历时 5 d 左右干旱。典型正常生育期播种后有少量降水干旱在播种后 8 d 左右出现历时 10 d 左右，然后到播种 60~70 d 会出现干旱现象，但得到及时缓解，从播种 70 d 后到玉米成熟将会一直处在干旱中。典型干旱生育期在图 7a 中可以看出，播种后和湿润生育期类似，无降水出现干旱历时 30 d 左右有所缓解；从生育期的第 50 d 直到成熟，干旱间断 4 次，每次历时 6~9 d 左右。

夏玉米灌水后干旱灌水指数如图 7b 所示，从图中可以看出，典型湿润、正常、干旱生育期分别需灌水 1 次、2 次、3 次，可消除夏玉米干旱。夏玉米的典型湿润生育期一次灌水集中在播种时，播种时降水少，气温高，蒸散发强烈，灌一水可以有效地解决土壤缺水带来的干旱。典型正常生育期，在播种后及时灌一水，其次到生育期的第 60 d 后灌一水，可以保证夏玉米正常生长免受干旱威胁。典型干旱生育期在播种后需及时灌水，其次在生育期的第 20 d、62 d 左右分别再灌一水，可以有效地消除干旱保证夏玉米的生长需水。

夏玉米生育期内降水比较集中，短时间内降水量大，田间容易积水形成涝灾，农田需要在降水量集中并且降雨量大的时候及时排水，避免洪涝对夏玉米生长带来不利影响。

3 讨论

本文发现在 3 个不同降水年型中，冬小麦总 ET_C 值呈现正常生育期>湿润生育期>干旱生育期，夏玉米总 ET_C 值干旱生育期>正常生育期>湿润生育期。湿润年型由于夏天降水天数多，日照时数低，空气湿度大，作物蒸散发量少，土壤蒸发少，因此湿润年型的蒸散发量最少，而干旱年型蒸散发量大于正常年型和湿润年型。冬小麦结果与夏玉米不同，冬小麦生长季包括越冬，冬季土壤蒸发少，且以土壤表层蒸发为主。干旱年份土壤表层水分比湿润年份和正常年份少，故土壤蒸发少，而作物蒸发量亦少，故出现干旱年份冬小麦总 ET_C 值最小，而正常年份冬小麦总 ET_C 值大于湿润年份，因湿润年份，总的空气湿度大，日照时数少等因素，导致用 Penman-Monteith 公式计算湿润年份的冬小麦总 ET_C 值小于正常年份。具体机制需进一步研究分析。

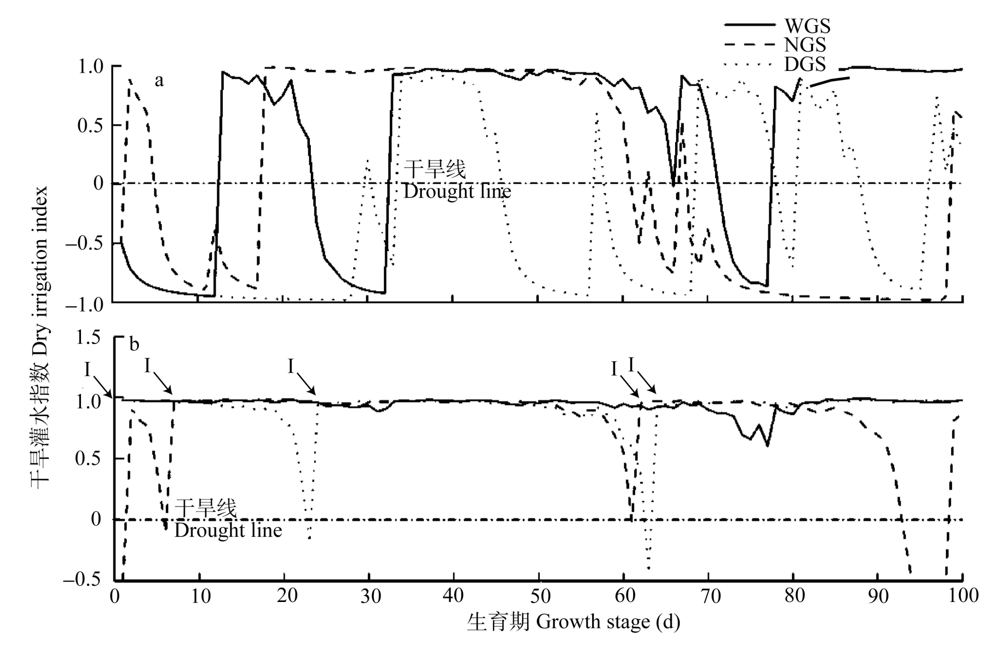


图 7　豫北地区不同实际典型生育期内无灌水(a)和灌水后(b)夏玉米干旱灌水指数的变化

Fig. 7　Dynamic changes of dry irrigation indexes (DII) of summer maize without irrigation (a) and with irrigation (b) in different actual representative growth seasons in northern Henan Province

目前华北平原冬小麦、夏玉米轮作的种植制度，在干旱、正常、湿润典型代表年，降水无法满足冬小麦和夏玉米正常生长需水需求，需灌溉确保其正常生长发育。这与王声锋等[14]、张志宇等[15]和 Sun 等[7]结果一致。本研究中，冬小麦和夏玉米轮作体系多年平均需灌水次数 5.1 次；冬小麦湿润、正常、干旱生育期分别需灌水 2 次、3 次、4 次；夏玉米分别需灌水 1 次、2 次、3 次，这与前人的研究[7,13−14,21−31]相近。没有灌溉的情况，每年作物都要发生不同程度的干旱，虽然一定程度的干旱胁迫可以提高作物品质，激发其吸水潜力[22,30]。然而，长时间干旱会导致作物产量受到影响。无灌溉情况(即雨养)下，自然降水在时间和空间上很难满足作物各个生育时期对水分的需求[24−25]。虽然夏玉米生长季降水多，强度大，但也存在有些玉米需水关键期无降水的情况，也会导致玉米生长期内干旱，这是夏天降水多于夏玉米需水，而需灌溉的原因。

确定灌溉定额和灌水定额是灌溉制度中的重要内容。本试验结果表明，每年的降水不同、干旱情况也不同，很难确定统一的灌溉定额。但是，目前很多研究主要针对冬小麦的几个关键生长发育期来确定灌溉时间。因为，保证作物生长关键期不缺水，在很大程度上降低了干旱对作物生长的影响[17−18]。这与本文的结果不尽相同，因为有些年份冬小麦生长关键期并不是干旱需灌水的时间点，故不用灌溉，出现这些区别的一个关键点是对干旱时间的把握不同。

干旱通过干旱指数来量化，简单明确，在很多研究使用[26−31]。本文建立的干旱灌水指数与 CWSI[8−9]和 Shi 等[26]研究的指数，都可以确定作物干旱缺水节点，得出的结果具有很好的可靠性。本文的干旱灌水指数注重灌溉时间节点，在上文公式中，强调了作物需水与土壤中作物可利用水分比值。当土壤水分无法满足作物需水，出现水分胁迫，作为灌溉节点。改进了仅以土壤含水量达到田间持水率的一个临界值作为灌溉节点问题。

本文仅是通过 1951—2013 年的气象数据结合豫北地区一些观测点的资料，进行作物干旱指数的构建。对豫北地区农业灌溉具有一定的参考意义，至于其代表性需要通过进一步的研究证实。本文的灌溉次数结果与前人的研究以及当地灌溉经验大体一致，未来的研究应该进一步加强气候变化对灌溉影响的研究以及完善把握灌溉时间节点的灌溉制度。

4　结论

在 3 个典型降水年中，冬小麦生育期总 ET_C 值呈现正常生育期>湿润生育期>干旱生育期，夏玉米总 ET_C 值干旱生育期>正常生育期>湿润生育期。

1951—2013 年干旱灌水指数得到多年需灌水次数为 2~7，大多集中在 4~6 次，比较干旱年份需灌水 7 次。因为冬小麦在较干旱年份需 4 次灌水，保证其正常生长发育。而夏玉米，生育期降水多，总量上可满足其生长需水需求，但时空上不均衡，致使夏玉

米干旱年份依然需灌水3次。

典型生育期分析发现：湿润、正常、干旱3个不同典型生育期都会出现干旱现象，均需灌水才能满足作物正常生长需求。冬小麦湿润、正常、干旱生育期分别需灌水2次、3次、4次；夏玉米分别需灌水1次、2次、3次，才能有效缓解干旱对作物生长带来的不利影响。

干旱灌水指数可作为作物干旱指数，能很好地确定作物需灌溉的时间节点，给作物灌溉提供参考，当连续出现负值时，表明作物进入严重干旱时期，需灌水，偶尔出现干旱，可作为作物亏水调节，激发其生长发育潜力。但干旱胁迫的时间尺度很难确定，需更多的研究探索。

参考文献 References

[1] Milly P C D, Wetherald R T, Dunne K A, et al. Increasing risk of great floods in a changing climate[J]. Nature, 2002, 415(6871): 514–517

[2] Mishra A K, Singh V P. A review of drought concepts[J]. Journal of Hydrology, 2010, 391(1/2): 204–216

[3] Mishra A K, Singh V P. Drought modeling — A review[J]. Journal of Hydrology, 2011, 403(1/2): 157–175

[4] Yoo J, Kwon H H, Kim T W, et al. Drought frequency analysis using cluster analysis and bivariate probability distribution[J]. Journal of Hydrology, 2012, 420–421: 102–111

[5] Mao K B, Ma Y, Xia L, et al. The monitoring analysis for the drought in China by using an improved MPI method[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2012, 11(6): 1048–1058

[6] Shang S H, Mao X M. Application of a simulation based optimization model for winter wheat irrigation scheduling in North China[J]. Agricultural Water Management, 2006, 85(3): 314–322

[7] Sun H Y, Shen Y J, Yu Q, et al. Effect of precipitation change on water balance and WUE of the winter wheat-summer maize rotation in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(8): 1139–1145

[8] Chen J Z, Lin L R, Lü G A. An index of soil drought intensity and degree: An application on corn and a comparison with CWSI[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(6): 865–871

[9] Jackson R D, Idso S B, Reginato R J, et al. Canopy temperature as a crop water stress indicator[J]. Water Resources Research, 1981, 17(4): 1133–1138

[10] 袁国富，罗毅，孙晓敏，等．作物冠层表面温度诊断冬小麦水分胁迫的试验研究[J]．农业工程学报, 2002, 18(6): 13–17
Yuan G F, Luo Y, Sun X M, et al. Winter wheat water stress detect ion based on canopy surface temperature[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(6): 13–17

[11] 张振华，蔡焕杰，杨润亚，等．膜下滴灌棉花产量和品质与作物缺水指标的关系研究[J]．农业工程学报，2005，21(6): 26–29
Zhang Z H, Cai H J, Yang R Y, et al. Relationships between yield, quality and CWSI of cotton under drip irrigation with mulch[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(6): 26–29

[12] 关红杰，李久生，栗岩峰．干旱区棉花水分胁迫指数对滴灌均匀系数和灌水量的响应[J]．干旱地区农业研究，2014，32(1): 52–59
Guan H J, Li J S, Li Y F. Response of crop water stress index to drip system uniformity and irrigation amount in arid regions[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(1): 52–59

[13] 董宝娣，张正斌，刘孟雨，等．小麦不同品种的水分利用特性及对灌溉制度的响应[J]．农业工程学报，2007，23(9): 27–33
Dong B D, Zhang Z B, Liu M Y, et al. Water use characteristics of different wheat varieties and their responses to different irrigation schedulings[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(9): 27–33

[14] 王声锋，段爱旺，张展羽，等．基于随机降水的冬小麦灌溉制度制定[J]．农业工程学报, 2010, 26(12): 47–52
Wang S F, Duan A W, Zhang Z Y, et al. Winter wheat irrigation schedule on stochastic precipitation[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(12): 47–52

[15] 张志宇，郄志红，吴鑫淼．冬小麦–夏玉米轮作体系灌溉制度多目标优化模型[J]．农业工程学报，2013，29(16): 102–111
Zhang Z Y, Qie Z H, Wu X M. Multi-objective optimization model of irrigation schedule for winter wheat-summer maize rotation system[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(16): 102–111

[16] Shang S H, Li X C, Mao X M, et al. Simulation of water dynamics and irrigation scheduling for winter wheat and maize in seasonal frost areas[J]. Agricultural Water Management, 2004, 68(2): 117–133

[17] He J Q, Cai H J, Bai J P. Irrigation scheduling based on CERES-Wheat model for spring wheat production in the Minqin Oasis in Northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2013, 128: 19–31

[18] Ma Y, Feng S Y, Song X F. Evaluation of optimal irrigation scheduling and groundwater recharge at representative sites in the North China Plain with SWAP model and field experiments[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 116: 125–136

[19] Ozelkan E, Chen G, Ustundag B B. Multiscale object-based drought monitoring and comparison in rainfed and irrigated agriculture from Landsat 8 OLI imagery[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2016, 44: 159–170

[20] Yang J Y, Mei X R, Huo Z G, et al. Water consumption in summer maize and winter wheat cropping system based on SEBAL model in Huang-Huai-Hai Plain, China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2015, 14(10): 2065–2076

[21] Kong F L, Cai W T, Shi L G, et al. The characteristics of annual water consumption for winter wheat and summer maize in North China Plain[J]. Procedia Engineering, 2012,

28: 376–381
[22] Liu X W, Feike T, Shao L W, et al. Effects of different irrigation regimes on soil compaction in a winter wheat-summer maize cropping system in the North China Plain[J]. CATENA, 2016, 137: 70–76
[23] Jentsch A, Beierkuhnlein C. Research frontiers in climate change: Effects of extreme meteorological events on ecosystems[J]. Comptes Rendus Geoscience, 2008, 340(9/10): 621–628
[24] Xu K, Yang D W, Yang H B, et al. Spatio-temporal variation of drought in China during 1961–2012: A climatic perspective[J]. Journal of Hydrology, 2015, 526: 253–264
[25] Zhang Q, Peng J T, Singh V P, et al. Spatio-temporal variations of precipitation in arid and semiarid regions of China: The Yellow River basin as a case study[J]. Global and Planetary Change, 2014, 114: 38–49
[26] Shi J C, Li S, Zuo Q, et al. An index for plant water deficit based on root-weighted soil water content[J]. Journal of Hydrology, 2015, 522: 285–294
[27] 中国主要农作物需水量等值线图协作组. 中国主要农作物需水量等值线图研究[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1993
Chinese Main Crops Required Water Contour Map Wrote by Cooperation Goup. Chinese Main Crops Required Water Contour Map[M]. Beijing: China Agriculture Science and Technique Press, 1993
[28] 袁娜娜. 室内环刀法测定土壤田间持水量[J]. 中国新技术新产品, 2014(9): 184
Yuan N N. Methods of indoor cutting-ring to measure soil field capacity[J]. China New Technologies and Products, 2014(9): 184
[29] 叶守泽. 水文水利计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1992: 83
Ye S Z. Hydrological and Hydraulic Calculation[M]. Beijing: Water Power Press, 1992: 83
[30] Du T S, Kang S Z, Sun J S, et al. An improved water use efficiency of cereals under temporal and spatial deficit irrigation in north China[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(1): 66–74
[31] Livellara N, Saavedra F, Salgado E. Plant based indicators for irrigation scheduling in young cherry trees[J]. Agricultural Water Management, 2011, 98(4): 684–690